

# CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS E SUA APLICABILIDADE NA INDÚSTRIA

Celiane Mendes da Silva<sup>1</sup>

Talvanes Lins e Silva Jr.<sup>2</sup>

Ismar Macário Pinto Jr.<sup>3</sup>

Engenharia Civil



ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

## RESUMO

A reologia é a ciência que estuda o comportamento deformacional e do fluxo de matéria, incluindo as propriedades de elasticidade, viscosidade e plasticidade de uma massa, ou um corpo, submetido à tensões. Essa é também caracterizada como o ramo da físico-química que investiga as propriedades dos corpos que sofrem deformação ou escoamento. A respeito da matéria que sofre escoamento, tem-se que o estudo reológico dos fluidos é de suma importância para a compreensão dos estados daqueles que apresentam um comportamento variado da maioria. Denominados fluidos Não-Newtonianos, os tais não seguem o padrão idealizado por Newton, sendo sua reação, quando submetido à determinadas tensões, ainda um fato exclusivo a ser analisado via parâmetros reológicos. Nesses fluidos, a viscosidade varia proporcionalmente à energia cinética que se imprime sobre eles, respondendo de forma quase instantânea, não apresentando taxas de deformação proporcionais às tensões cisalhantes aplicadas. Com relação a isto, vê-se também que estas intrínsecas reações são de grande utilidade no ramo da indústria e em várias áreas da Engenharia. Em vista disso, o presente artigo tem por objetivo a qualificação dos fluidos Não-Newtonianos no âmbito da reologia, bem como a contribuição de suas específicas características para a indústria.

## PALAVRAS-CHAVE

Reologia. Fluidos. Fluidos Não-Newtonianos.

## ABSTRACT

Rheology is the science that studies deformational behavior and the flow of matter, including the elasticity, viscosity and plasticity properties of a mass, or a body, subjected to stresses. It is also characterized as the branch of physicochemical that investigates the properties of bodies that undergo deformation or flow. Regarding the matter which flows, there is the study of rheological fluids that is of great importance for the understanding of the states of those who present a different behavior of the majority. Named as Non-Newtonian fluids, those that are not subject to Newton's idealized standard, being their reaction, when subjected to certain stresses, still an exclusive fact to be analyzed via rheological parameters. In these fluids, the viscosity varies proportionally to the kinetic energy that impresses on them, responding almost instantaneously, not presenting deformation rates proportional to the shear stresses applied. In relation to this, it is also seen that these intrinsic reactions are of great utility in the branch of industry and in several areas of engineering. In view of this, the present article aims at the qualification of the non-Newtonian fluids in the scope of rheology, as well as the contribution of its specific characteristics to the industry.

## KEYWORDS

Rheology. Fluids. Non-newtonian Fluids.

## 1 INTRODUÇÃO

A reologia (do grego *RHEOS* que significa escoamento e *LOGOS* que significa conhecimento) consiste no estudo do escoamento ou deformação do material em estudo, quando submetido a uma tensão. (CORRÊA *et al.* 2005). Segundo Motta (2007, p. 2), esse termo foi introduzido pelo professor Bingham do Lafayette College, para descrever a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria. Seus primeiros estudos foram em propriedades e comportamentos de uma variedade de materiais de grande importância científica e tecnológica na atualidade, tais como asfalto, lubrificantes, plásticos, borrachas, suspensões, polímeros, detergentes e tintas de impressão, dentre outros.

No âmbito do comportamento deformacional, o tal é quem define a classificação dos fluidos e a diferença entre um corpo sólido e um elemento fluido.

Segundo Barra (2002, p. 3):

A deformação de um sólido pode ser caracterizada por leis que descrevem a alteração do volume, tamanho ou forma, enquanto o escoamento de um fluido, que pode estar no estado gasoso ou líquido, é caracterizado por leis que descrevem a variação

contínua da taxa ou grau de deformação em função da tensão aplicada. Em reologia, a classificação entre um material sólido, líquido ou gasoso é determinada pelo número de Deborah ( $De$ ). Esse número estabelece a relação entre tempo de relaxamento do material ( $\lambda_r$ ), e o tempo de duração da aplicação de uma deformação ou tensão ( $t$ ).

$$De = \frac{\lambda_r}{t}$$

Onde:

$\lambda_r$  (tempo de relaxamento) - tempo necessário para ocorrer algum movimento molecular;

$De$  (Número de Deborah) - relação entre as forças elásticas e viscosas que atuam no material;

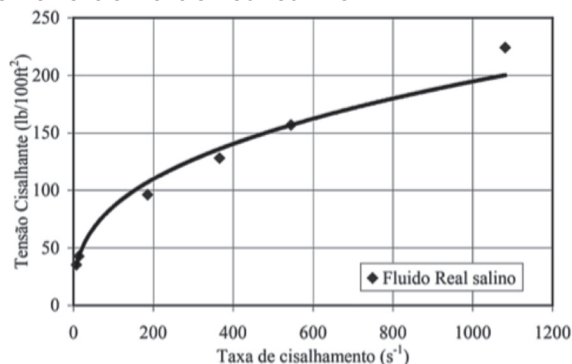
$t$  (tempo do experimento) - tempo de aplicação da tensão ou deformação.

No âmbito dos fluidos, quanto à deformação, estes podem ser caracterizados como reversíveis ou elásticos e irreversíveis ou viscosos.

A respeito da representação gráfica, dada pela curva de fluxo, pode-se perceber como a tensão cisalhante varia em função da taxa de cisalhamento, e esta define o comportamento reológico dos fluidos viscosos, sendo a equação matemática entre estas duas variáveis conhecida como equação de fluxo (MACHADO, 2002). De forma complementar, os fluidos viscosos podem ser caracterizados também através da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, chamada de curva de viscosidade.

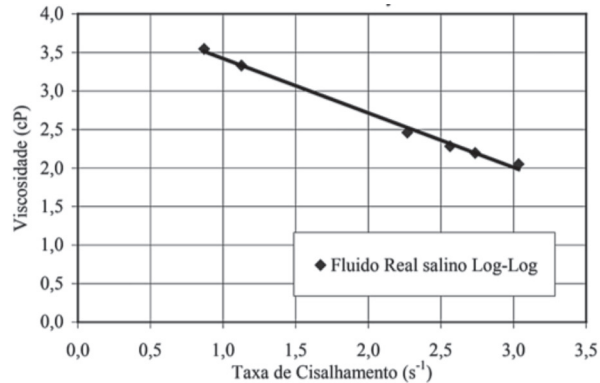
Acerca disso, com base no estudo sobre as propriedades reológicas do fluido de perfuração realizado na PUC – RIO em 2014, utilizando-se o modelo reológico de Herschell-Buckley, pôde-se representar os gráficos da curva de fluxo e de viscosidade obtidos para o fluido real goma xantana, HPA e bactericida com a adição de formato de sódio ( $\text{NaCOOH}$ ) 40% em peso, mostrados a seguir:

FIGURA 1 – Curva de fluxo do fluido real salino



Fonte: PUC – RIO (2014).

FIGURA 2 – Curva de viscosidade do fluxo real salino



Fonte: PUC – RIO (2014).

Entretanto, no que diz respeito à classificação de fluidos como Newtonianos e Não-Newtonianos, deve-se tomar como base a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido, onde para os ditos Não-Newtonianos, tem-se que essa principal relação não é constante em seu comportamento.

Com relação à isso, percebe-se que devido as propriedades intrínsecas dos fluidos não-newtonianos, estes apresentam diversos usos práticos na indústria. Inúmeras operações nas utilizam fluidos com características complexas e o estudo completo do comportamento mecânico e da natureza de cada um desses fluidos é necessário para determinar suas aplicações em procedimentos como dimensionamento de bombas, tubulações, trocadores de calos, misturadores, entre outros (COSTA, 2017).

Sendo assim, este trabalho objetiva o estudo detalhado das propriedades inerentes ao comportamento dos fluidos não-newtonianos e sua classificação relacionada a esta qualificação, bem como seu subsídio para a indústria na compreensão de sua aplicabilidade nos diversos procedimentos industriais e otimização dos processos envolvidos.

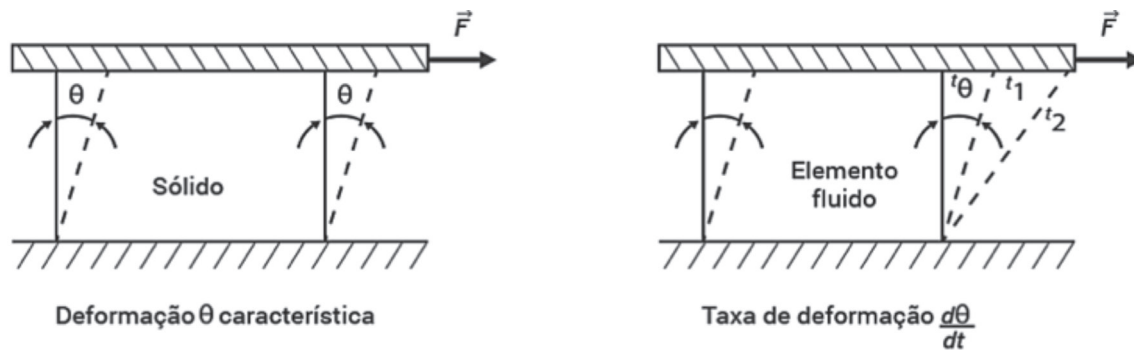
## 2 CARACTERIZAÇÃO DE FLUIDOS

Um fluido é caracterizado como uma substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento, sem levar em consideração o quão pequena possa ser essa tensão.

Os fluidos incluem os líquidos, os gases, os plasmas e, de certa maneira, os sólidos plásticos, cuja principal característica está relacionada à propriedade de não resistir à deformação e apresentar a capacidade de fluir, ou seja, possuem a habilidade de tomar a forma de seus recipientes. Tal propriedade é proveniente da sua incapacidade de suportar uma tensão de cisalhamento quando em equilíbrio estático.

Um sólido elástico, quando sob ação de uma tensão cisalhante, resiste à força externa, deformando-se de um ângulo  $\theta$  até o seu limite de elasticidade. A partir daí, não mais resiste a tensões cisalhantes. No fluido, o ângulo de deformação é em função do tempo, tem-se, portanto, uma taxa de deformação angular ( $d\theta/dt$ ) (LIVI, 2015).

FIGURA 3 – Deformação de um sólido e de um elemento de fluido submetidos a tensões cisalhantes.



Fonte: LIVI (2015).

Assim, os fluidos compreendem as fases líquidas e gasosas (de vapor) das formas físicas nas quais a matéria existe. A distinção entre um fluido e o estado sólido da matéria é clara quando você compara os seus comportamentos: um sólido deforma-se quando uma tensão de cisalhamento lhe é aplicada, mas não continuamente (TELLES, 2003).

Os fluidos podem ser classificados de acordo com o comportamento deformacional e a partir da relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação do elemento.

## 2.1 COMPORTAMENTO DEFORMACIONAL

Nos fluidos podem ocorrer formas de deformações semelhantes às que ocorrem nos sólidos.

No âmbito da análise do comportamento deformacional, os materiais podem ser classificados em reversíveis ou elásticos e irreversíveis ou viscosos. A classe dos sólidos elásticos, trata dos sistemas que não escoam onde a deformação é reversível e obedecem à Lei de Hooke. Já para os fluidos, estes podem ser considerados como irreversíveis ou viscosos que são sistemas onde há o escoamento e sua deformação é irreversível obedecendo a Lei de Newton, de viscosidade constante (FREIRE, 2012).

Assim, a diferença entre um sólido e um fluido ideal está justamente na resposta ou comportamento de ambos quando submetidos a um esforço. Assim, nos fluidos ideais, diferentemente dos sólidos, todas as deformações envolvem algum tipo de escoamento irreversível entre as moléculas ou entre as camadas.

O tipo mais comum de deformação nos fluidos é por cisalhamento simples, que gera um escoamento caracterizado pelo movimento relativo das moléculas do fluido devido à ação de uma força externa.

Uma das propriedades medida na deformação de fluidos é a viscosidade, que assim como o módulo de elasticidade (para sólidos), é um fator determinante para o uso e aplicações dos materiais fluidos.

### 2.1.1 VISCOSIDADE

A viscosidade pode ser entendida como uma resistência do fluido a um escoamento de cisalhamento, ou seja, quando um fluido é submetido a uma tensão, se ele flui de maneira rápida pode-se dizer que ele é pouco viscoso – como exemplo a água – já se o fluido possui certa resistência a escoar e por isso sua fluidez é baixa, pode-se dizer que ele é um fluido altamente viscoso – como exemplo os óleos.

Ela é uma propriedade que também pode ser explicada como um atrito interno das partículas dos fluidos. No âmbito dos gases, a viscosidade está relacionada com a transferência de impulso devido à agitação molecular ao ponto que para os líquidos relaciona-se mais com as forças de coesão entre as moléculas.

De acordo com Ferreira *et al* (2005, p. 84):

Isaac Newton, em 1687, definiu a viscosidade de um fluido como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna e, quanto maior o grau de fricção interna de um fluido, maior é a sua viscosidade. Em sua abordagem matemática, Newton utilizou o modelo de duas placas de áreas  $A$ , separadas por uma distância  $y$ , movimentadas através da aplicação de uma força  $F$ . De acordo com esse modelo, a força requerida por unidade de área ( $F/A$ ) para manter uma diferença de velocidade entre as placas ( $dv/dx$ ) é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade através do líquido. Assim, o coeficiente de proporcionalidade é igual a viscosidade ( $\eta$ ). A força por unidade de área e conhecida como tensão de cisalhamento ( $\sigma$ ) e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ). Substituindo ( $F/A$ ) por ( $\sigma$ ) e ( $dv/dx$ ) por ( $\dot{\gamma}$ ), tem-se a equação de Newton para a viscosidade de um fluido.

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \rightarrow \eta \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$$

Conforme Costa (2017, p. 1), a viscosidade para a maioria dos fluidos newtonianos tende a diminuir com o aumento da temperatura devido ao movimento browniano das moléculas constituintes (quanto maior a viscosidade, maior a taxa de diminuição). No entanto, para a pressão, à medida que esta diminui a viscosidade também cai.

## 3 CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA

Os fluidos também podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Com base neste aspecto, os fluidos são classificados como: Fluido Newtoniano ou Fluido Não Newtoniano. Tal classificação está associada à caracterização da tensão, como linear ou não linear no que diz respeito à dependência desta tensão com relação à deformação e à sua derivada (RODRIGUES, 2005).

### 3.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Fluidos que apresentam a tensão cisalhante diretamente proporcional à taxa de deformação angular são chamados de Newtonianos e, a constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) do fluido. A água e o ar são exemplos desse tipo de fluidos.

Segundo Teles (2003, p. 9), um material é dito isotrópico se suas propriedades mecânicas independem do referencial. Assim, um tensor com as mesmas componentes em relação a qualquer base retangular unitária é dito um tensor isotrópico.

Logo, assumindo que o estado de tensão para um fluido sob movimento de corpo rígido é dado por um tensor isotrópico, então considerando um fluido em movimento geral, é natural decompor o tensor tensão em duas partes:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + T_{ij}$$

em que os valores de  $T_{ij}$  dependem da taxa de deformação (TELES, 2003).

De acordo com Freire (2012, p. 9), a viscosidade deste seguimento de fluidos é constante a uma dada temperatura e independente da taxa de deformação ao qual o líquido está submetido, seguindo a lei de Newton. Esta classe abrange todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos (ex.: água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais).

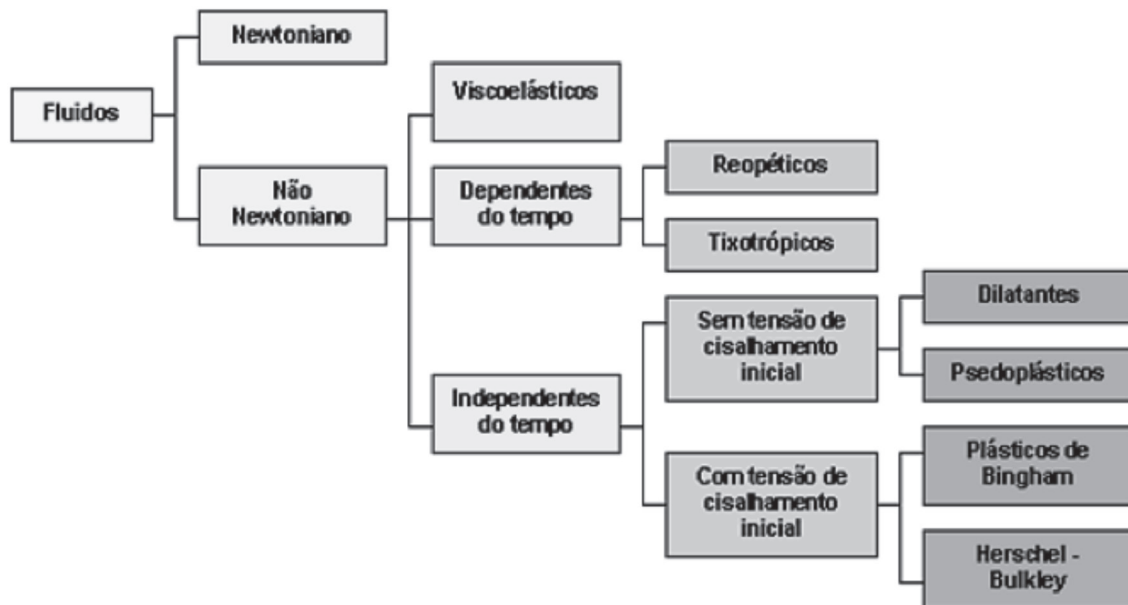
### 3.2 FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

A respeito dos fluidos não newtonianos, a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação angular vai depender do valor da tensão cisalhante e do tempo de aplicação desta.

Há materiais plásticos, como parafina, que até um determinado limite, comportam-se como sólidos elásticos, mas, ultrapassado esse limite, comportam-se como fluidos.

Além disso, os fluidos não newtonianos ainda podem ser classificados em: visco-elásticos, dependentes e independentes do tempo, como se pode observar na Figura 4.

FIGURA 4 – Classificação reológica de fluidos



Fonte: COSTA (2017).

### 3.2.1 VISCOELÁSTICOS

Diversos materiais apresentam um comportamento mecânico intermediário entre os extremos de materiais puramente viscosos e puramente elásticos. Os fluidos viscoelásticos apresentarão propriedades de ambos. Ou seja, sua equação constitutiva será uma intermediária entre as propostas por Hooke e Newton.

Determinar se um fluido possui comportamento elástico é de suma importância, visto que suas propriedades serão totalmente singulares. Esses materiais surgiram a partir de pesquisas espaciais e encontram-se aplicados em diferentes setores, devido ao fato de terem uma estrutura extremamente adaptável, como por exemplo, na fabricação de colchões e travesseiros. Esses produtos também possuem aplicações na área de saúde, pois possuem ação terapêutica no tratamento de dores e fadiga muscular (COSTA, 2017).

A determinação da elasticidade é dada por diferentes parâmetros, dependendo dos diferentes tipos de escoamento a que o fluido será submetido. Os líquidos viscosos não possuem forma geométrica definida e escoam irreversivelmente quando submetidos a forças externas. Como exemplo tem-se as massas de farinha de trigo, gelatinas, queijos, líquidos poliméricos, glicerina, plasma, biopolímeros, ácido hialurônico, saliva, goma xantana (FREIRE, 2012).



Os fluidos viscoelásticos possuem uma memória, ou seja, após sofrerem alguma perturbação, eles tenderão a voltar ao seu lugar de “conforto”. Para entender, pode-se pensar em uma mola quando é alongada e que após ser solta volta para sua posição inicial. Nos fluidos viscoelásticos ocorre a mesma coisa, porém, o retorno para essa posição não sucede de maneira perfeita, já que não é um material elástico perfeito (COSTA, 2017).

Citando Freire (2012, p. 10), os fluidos viscoelásticos são fluidos que possuem características de líquidos viscosos com propriedades elásticas (Modelo de Maxwell) e de sólidos com propriedades viscosas (Modelo de Kelvin-Voigt), ou seja, possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas. Estas substâncias quando submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação e quando esta cessa, ocorre uma certa recuperação da deformação sofrida.

Pode-se dizer que todo material apresenta um tempo de relaxação característico, que está associado à memória do fluido. Nos fluidos viscoelásticos, o parâmetro que mede esta característica é o número de Deborah.

Costa (2017, p. 3) afirma que há dois parâmetros são essenciais para avaliar a viscoelasticidade de um fluido, o módulo viscoso e o módulo elástico.

O módulo Elástico ou de armazenamento ( $G'$ ) é a medida elástica do material, ou seja, a capacidade que o material possuir de armazenar energia. Já o módulo viscoso ou de perda ( $G''$ ) determina a capacidade do fluido em dissipar energia pela forma de calor (COSTA, 2017).

### 3.2.2 DEPENDENTES DO TEMPO

Segundo Freire (2012, p. 11), alguns fluidos apresentam mudança na viscosidade em função do tempo sob condições constantes de taxa de cisalhamento.

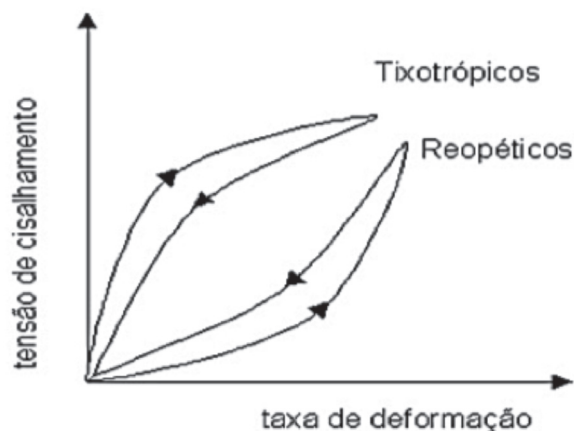
Neste caso, há duas categorias a serem consideradas, a Tixotropia e a Reopexia (FREIRE, 2012):

No âmbito da Tixotropia, tem-se os sistemas cuja viscosidade diminui com o tempo para uma taxa de cisalhamento constante e aumenta quando esta taxa de cisalhamento diminui por recuperação estrutural do material (reversível). Como exemplo observa-se suspensões concentradas, emulsões, soluções proteicas, petróleo cru, tintas, ketchup, entre outros.

Já a Reopexia, trata daqueles que apresentam aumento da viscosidade com o tempo quando submetidos à deformação constante. Seu valor retorna ao inicial quando a deformação é interrompida, tendo também comportamento reversível. Como um exemplo desses fluidos tem-se a argila bentonita.

A Tixotropia e a Reopexia podem ocorrer em combinação com os comportamentos de escoamento, conforme indica a Figura 4.

FIGURA 5 – Curva de escoamento de fluidos Não Newtonianos de propriedades dependentes do cisalhamento



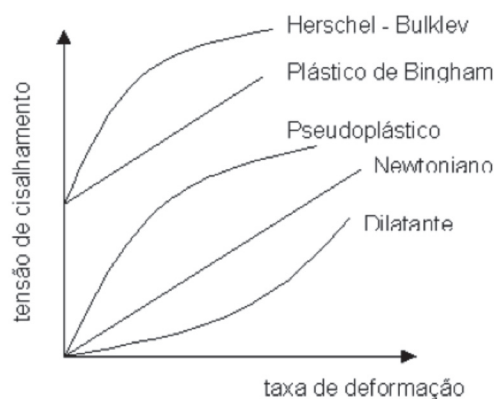
Fonte: FREIRE (2012).

### 3.2.3 INDEPENDENTES DO TEMPO

Os fluidos não-newtonianos independentes do tempo são aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

A Figura 6 mostra o comportamento reológico do fluido newtoniano e dos fluidos não newtonianos independentes do tempo.

FIGURA 6 – Curva de escoamento do Fluido Newtoniano e de fluidos Não-Newtonianos de propriedades independentes do tempo e cisalhamento



Fonte: COSTA (2017).

Estes fluidos ainda são subdivididos em com ou sem tensão inicial.

### 3.2.3.1 SEM TENSÃO INICIAL

São aqueles que não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar e compreendem a maior parte dos fluidos não newtonianos.

De acordo com Costa (2017, p. 10), dentro desta classe destacam-se:

- Pseudoplásticos: São substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente.

Como exemplo, efetuando-se a leitura em um viscosímetro, rotacionando-o de baixa para alta velocidade e retornando para a baixa, se as leituras nas mesmas velocidades coincidirem, o material é considerado pseudoplástico independente de tempo e de cisalhamento fino.

- Dilatantes: São substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No caso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que frequentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, dessa forma, um aumento da viscosidade aparente.

O comportamento dilatante é mais raro que a pseudoplasticidade, e é observado em fluidos que contêm altos níveis de defloculantes como argilas, lama, amido de milho em água, ingrediente de balas, silicato de potássio e areia.

### 3.2.3.2 COM TENSÃO INICIAL

São os que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar.

Citando Freire (2012, p. 13), dentre os fluidos desta classe encontram-se:

- Plástico de Bingham: Este tipo de fluido apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial. Esse fluido comporta-se como sólido em condições estáticas ou de repouso, e após a aplicação de uma força ele começa a fluir.
- Herschel-bulkley: Também chamado de Bingham generalizado, este tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear. Esta relação depende do expoente adimensional  $n$ , característico para cada fluido.

Modelo de Herschel-bulkley

$$\tau_{yx} = \pm \tau_0 - \mu_0 \left( \frac{du_x}{dy} \right)^n \quad \text{para} \quad |\tau_{yx}| > |\tau_0|$$

$$\frac{du_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$

Fonte: FREIRE, 2012

$\tau_0$

Na qual:

$\tau_0$  é a tensão de cisalhamento inicial,

$\mu_0$  é uma constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

O sinal positivo de  $\tau_0$  é utilizado quando  $\tau_{yx}$  é positivo ou negativo, caso contrário.

## 4 APLICABILIDADE NA INDÚSTRIA

Fluidos não-newtonianos apresentam comportamento complexo, que deve ser pesquisado e entendido para que sua aplicabilidade aumente gradativamente, visto que suas características são importantes para o avanço tecnológico em diversos setores, como a indústria petrolífera, farmacêutica, de cosméticos, entre outras.

Na indústria do petróleo, existem diversos processos que são realizados para que seja possível ocorrer a extração do petróleo do poço. Para a execução dessa exploração, é necessária a utilização de fluidos de perfuração desde o processo inicial - para a perfuração dos poços - até aos processos finais, para seu tamponamento.

Durante a perfuração de poços de petróleo, são utilizados fluidos não-newtonianos com aditivos como a bentonita, que auxiliam na extração de óleo e no carregamento de cascalhos. Estes fluidos devem apresentar características reológicas como viscosidade, tensão limite de escoamento e taxa de deformação ideais para a cada condição de poço, onde auxiliam no processo de escoamento do óleo presente nos reservatórios.

Assim sendo, é possível determinar o melhor fluido a ser empregado para cada processo e otimizar progressivamente os procedimentos, evitando custos desnecessários e tempo que poderia ser redirecionado para outros setores.

Para alguns autores, os fluidos de perfuração são considerados como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até de gases. Sendo que, do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes (THOMAS, 2001).

Santos (2012, p. 122) afirma que a lama de perfuração, fluido não-newtoniano, é o elemento vital no controle do poço perfurado, chamado também de fluido de perfuração, ele é utilizado durante todo o processo. Através de um sistema composto por tanques de armazenamento de fluidos de alta capacidade, bombas de lama de alta vazão, coluna de perfuração e broca, sistemas de limpeza de fluidos entre outros, atuam em um circuito contínuo na intenção de manter a integridade das formações geológicas atravessadas, a segurança do pessoal de perfuração e a integridade do meio ambiente.

A reologia também tem sido assunto de suma importância para as indústrias cosmética e farmacêutica, tendo em vista que a consistência e o espalhamento dos produtos devem ser reproduzidos de lote para lote, assegurando a qualidade tec-

nológica do produto acabado, devendo-se recorrer à incrementação de fluidos não newtonianos contendo as determinadas características (CORREA *et al.*, 2005).

O estudo das propriedades dos fluidos não newtonianos contribui também para o conhecimento da estrutura molecular, no controle de qualidade e aceitação de um determinado produto, auxilia no controle do processo industrial e em projetos de equipamentos no processamento dos materiais (ASSOCIACAO BRASILEIRA DE REOLOGIA, 2002).

Em um estudo realizado por Gratão *et al.* (2004, p. 652), relatou-se que, o conhecimento da viscosidade de soluções de açúcar invertido, comumente utilizado nas indústrias de alimentos e de bebidas, é um fator preponderante para os cálculos de engenharia que envolvem a seleção de equipamentos e o dimensionamento de bombas e tubulações, assim como para a implementação de um efetivo controle dos processos e garantia de qualidade do produto final.

Segundo Pinho (2003), para o desenvolvimento de sistemas passivos de amortecimento de vibrações, começam a ser utilizados fluidos de características não newtonianas cujas propriedades reagem à intensidade dos campos magnéticos, os chamados fluidos magneto-reológicos.

No campo da indústria da construção civil, a classe dos fluidos não-newtonianos destaca-se como sendo a caracterização do material mais consumido, o concreto. De acordo com Castro *et al.* (2011, p. 63), do ponto de vista reológico, esse material pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). E, em uma escala macroscópica, o concreto fresco flui como um líquido.

Alguns autores definiram o comportamento do concreto como um fluido newtoniano. Entretanto, uma observação mais casual do comportamento do concreto mostra que essa suposição não é correta, uma vez que o concreto exige a imposição de uma tensão ou força mínima para o início do escoamento, indicando que o seu comportamento não pode ser caracterizado por uma constante única (TATTERSALL, 1983).

Na literatura, devido a uma vasta evidência experimental das propriedades reológicas do concreto no estado fresco, concluiu-se que o material se comporta como um fluido plástico ou binghamiano para o intervalo das taxas de cisalhamento envolvidas no uso do material (CASTRO *et al.*, 2011).

## 5 CONCLUSÕES

Em função do exposto, pode-se concluir que a reologia é o estudo do comportamento deformacional de um fluido submetido à tensões ao longo de um intervalo de tempo. Tal estudo tem por objetivo a caracterização quanto às suas propriedades e classificar segundo o comportamento que o fluido apresenta.

A respeito da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação percebeu-se que aqueles que apresentam um comportamento linear no gráfico desta

relação são considerados newtonianos, já os opostos a esta idealização de Newton são chamados não-newtonianos.

Esses fluidos, diferentemente dos newtonianos, não apresentam propriedades bem definidas, como a dependência proporcional da tensão e deformação, dada pela viscosidade.

Nos fluidos complexos, a viscosidade pode ser função da cinemática de escoamento e variar no tempo. Além disso, os fluidos não-newtonianos podem ter comportamento elástico, dependente ou independente do tempo e que necessitem ou não da aplicação de uma tensão inicial para demonstrarem suas características.

Assim sendo, estudar as características reológicas desses fluidos se faz necessária devido à sua vasta aplicabilidade nos mais variados campos da indústria (cosmética, farmacêutica, petrolífera, construção civil), nas descobertas acerca de seu comportamento intrínseco e por sua eminente multifuncionalidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE REOLOGIA. [S.l.]. 2012. **Reologia**. Disponível em: <<http://www.reologiadobrasil.com.br/reologia.html>>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

BARRA, G. **Apostila de processos 4**. [S.l.]. 2002. Disponível em: <<http://emc5744.barra.prof.ufsc.br/Reologia%20parte%201.pdf>>. Acesso em 19 de agosto de 2018.

BRUNETTI, F. **Mecânica de Fluidos**. São Paulo: Pearson, 2005. 410p.

CARVALHO, L. F. **Mecânica de Fluidos**. Curitiba: UnicenP, Petrobras, 2002. 34 p.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C.. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: revisão. **Cerâmica**, [s.l.], v. 57, n. 341, p.63-75, mar. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132011000100009>.

CORREA, N. *et al.* **Avaliação do comportamento reológico de diferentes géis hidrofílicos**. Revista brasileira de ciências farmacêuticas, v. 41, n.1, p. 73-78, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcf/v41n1/v41n1a07.pdf>>. Acesso em 15 de agosto de 2018.

COSTA, C.M. **Caracterização Reológica de Fluidos Complexos**. Rio de Janeiro. PUC-RJ, 2017. 18p.

FERREIRA, E. *et al.* **Reologia de suspensões minerais: uma revisão**. Rem: revista escola de minas, v. 58, n. 1, p. 83-87, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v58n1/a14v58n1.pdf>>. Acesso em 15 de agosto de 2018.

FREIRE, I. S. **Reologia escoamento e deformação da matéria**. 2012. Disponível em < [www.sbtt.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/Mjc2NTc=>](http://www.sbtt.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/Mjc2NTc=>). Acesso em 20 de agosto de 2018.

GRATAO, A.C.A.; BERTO, M.I.; SILVEIRA JUNIOR, V. **Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade**. Ciência e tecnologia de alimentos, v. 24, n. 4, p. 652-656, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cta/v24n4/a29v24n4.pdf>>. Acesso em 15 de agosto de 2018.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos de transporte**: um texto para cursos básicos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e escoamento de fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 257 p.

MOTTA, M. K. F. **Maizena com água: fluido não-newtoniano**. 2007. Disponível em <[www.ifi.unicamp.br/%7Elunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2007/MarieleK\\_Tamashiro\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/%7Elunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/MarieleK_Tamashiro_RF.pdf)>. Acesso em 17 de agosto de 2018.

NASCIMENTO, C.R. **Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais**. Série rochas e minerais industriais. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/series\\_srmi/srmi-11.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_srmi/srmi-11.pdf)>. Acesso em 15 de agosto de 2018.

ORTEGA, H. **Escoamento de fluidos: propriedades reológicas, fluidos newtonianos e não-newtonianos**. Unicamp. São Paulo, 2012. Disponível em: <[www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula04\\_reologia.ppt](http://www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula04_reologia.ppt)>. Acesso em 17 de agosto de 2018.

PEREIRA, D.L.; HAMILTON-JUNIOR.; MAIRA, J. **Fenômenos dos transportes**. 2007. Disponível em <<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cin.ufpe.br%2F~clp%2FIntrodu%25E7%25E3o.doc&ei=96A7UMCwKKnn0QHHP4HYDA&usg=AFQjCNHzAukTK1nsDjWmU5ta3EILoUCsQg&sig2=kRbJdFinHP5G5m67bm4Etg>>. Acesso em 17 de agosto de 2018.

PINHO, F. M. C. T. **CÁLCULO DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS EM REGIME LAMINAR**: "Desenvolvimentos e aplicações recentes da metodologia dos volumes finitos". 2003. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2003.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Mecânica de Fluidos**, São Paulo, 2005.

SANTOS, M. B. **Perfuração de poços de petróleo: fluidos de perfuração**. Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, v. 2, n. 1, p.121-127, jan. 2012. Anual.



G. H. Tattersall, P. F. G. Banfi II, "The rheology of fresh concrete", Pitman, London, Inglaterra (1983) 347p.

TELES, R. D. S. Universidade Federal de São Carlos. **Mecânica dos fluidos**, São Carlos, dezembro, 2003.

THOMAS J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2001. 271p.

Universidade de São Paulo. **Reologia de Fluidos**. Disponível em < <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=246955>>. Acesso em 17 de agosto de 2018.

---

**Data do recebimento:** 30 de julho de 2018

**Data da avaliação:** 15 de dezembro de 2018

**Data de aceite:** 28 de janeiro de 2019

---

---

1. Discente do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: celianems@hotmail.com

2. Discente do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. Email: talinsjr@hotmail.com

2. Docente do Curso de Engenharia de Petróleo e Ambiental do Centro Universitário Tiradentes – UNIT.

E-mail: ismar.macario@souunit.com.br